

## 量子人工脳

～ 組み合わせ最適化問題を解くコヒーレント・イジングマシン～

国立情報学研究所 宇都宮聖子

ImPACT 「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」

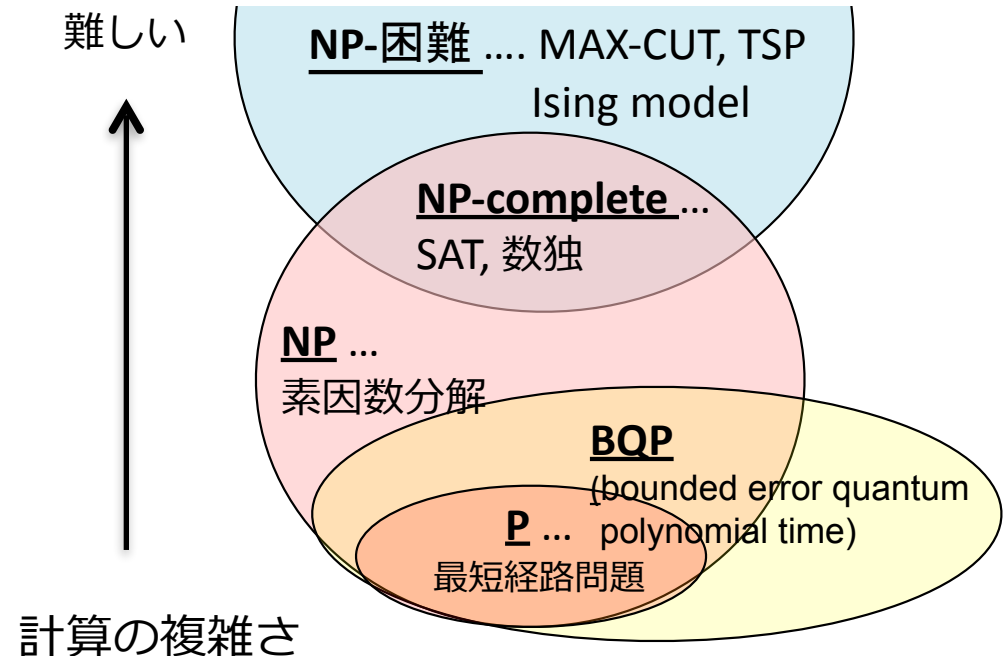
第1回アドバイザー会議

# 組み合わせ最適化問題

- ✓ 組み合わせ最適化問題(NP-hard) : 現代社会における最も重要な問題
  - 解きたい問題サイズの増加によって、計算時間が指数発散してしまう最も難しい問題
- ✓ 動的に変化する組み合わせ最適化問題
  - SNS解析, 危険予知, 脳機能ネットワークの解析など
  - 動的に変化するグラフのリアルタイム処理を行う
  - 時系列変化のデータに基づいて計算を行うため、扱うデータ量が膨大

## 組み合わせ最適化問題を効率よく解く手法

- ・ ニューラルネット (機械学習、脳型情報処理) :  
Deep learning(Siri、音声・画像認識),  
SyNAPSE(DARPA : ニューロチップ)
- ・ ヒューリスティック (焼き鈍し法など : そこそこよい近似解を高速に求める)
- ・ 量子アニーリング : D-waveなど。極低温動作が必要、大規模化が課題

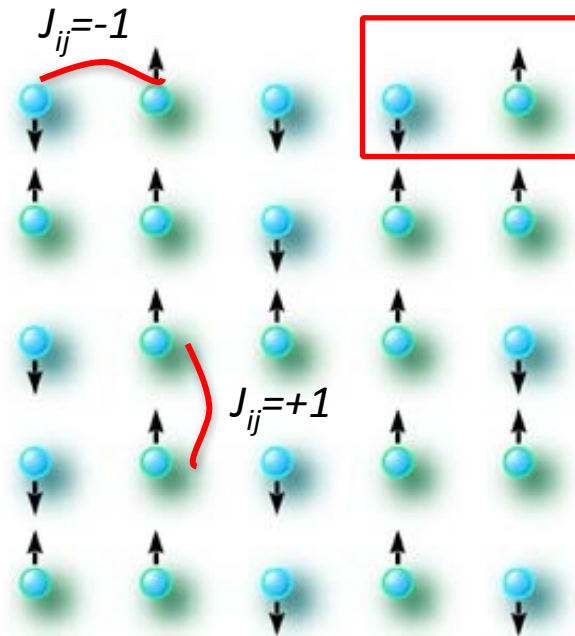


# スピンの組み合わせ問題 イジング・モデル

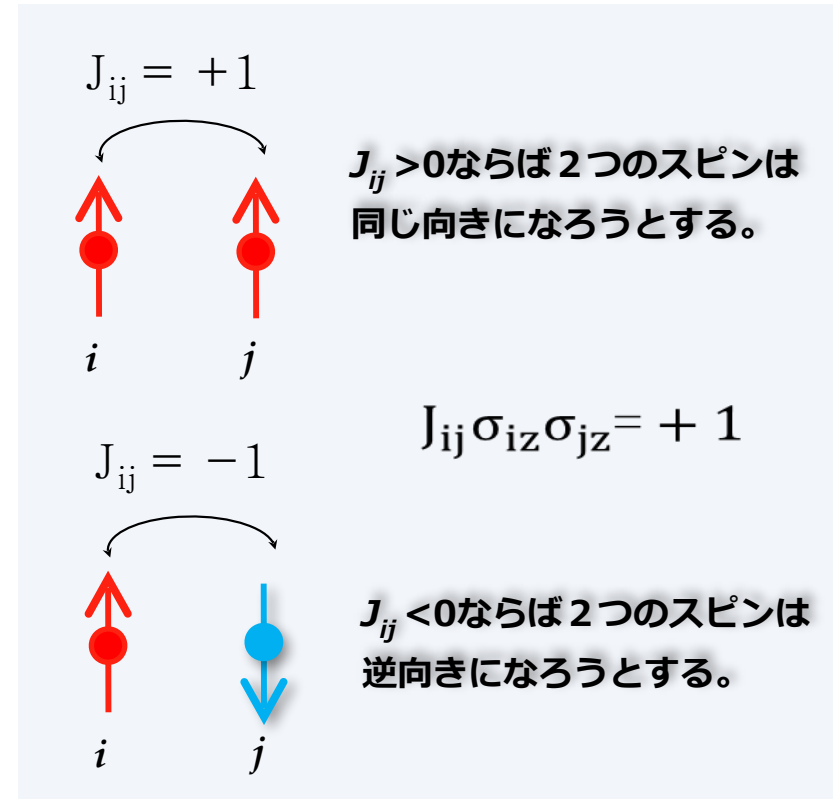
ある種の磁性体では、系のエネルギーはスピンの向きが（アップ、ダウン）のいずれか、によって以下のように決められる：

$$\mathcal{H} = - \sum_{i,j} J_{i<j} \sigma_{iz} \sigma_{jz}$$

$\sigma_{iz}$ : イジングスピン (+1: アップ、-1: ダウン)  
 $J_{ij}$ : 相互作用の強さ



再隣接のspin同士は相互作用をする( $J_{ij}$ )



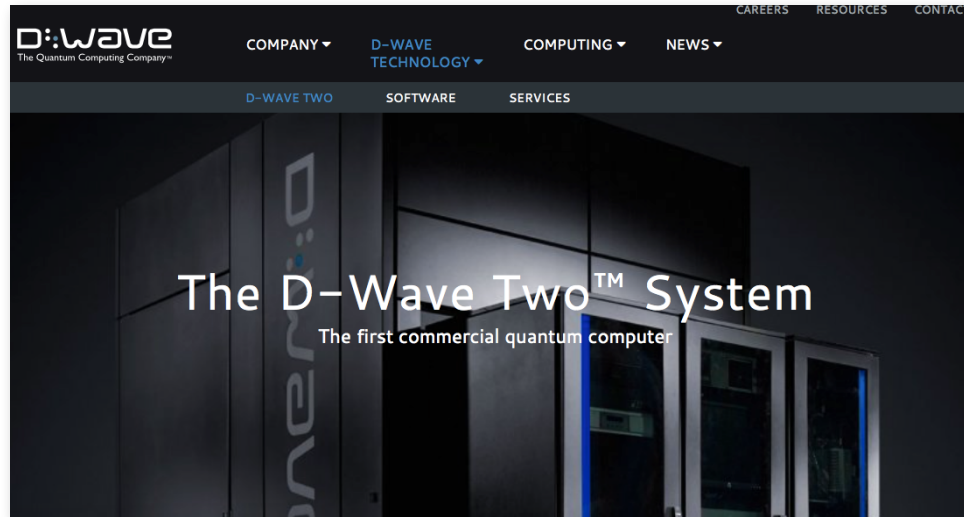
1, 2次元イジングモデル ➡ クラスP

2次元イジングモデル + 直流磁場

3次元イジングモデル ➡ クラスNP困難

# 世界初の商用量子アニーリングマシン

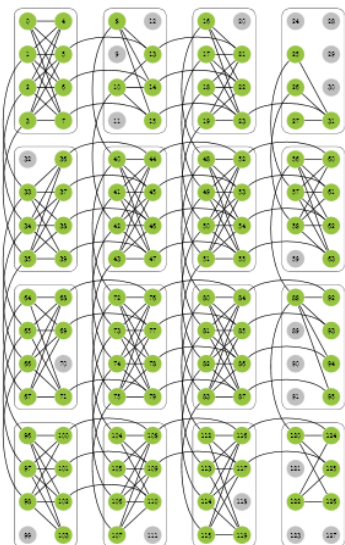
## D-wave II (D-wave systems, inc.)



- 超伝導 (FLUX)量子ビット 512 ビットを搭載
- 極低温へ冷却が必要  $T^{op} \sim 10\text{mk}$
- 原理：量子アニーリング (断熱計算)
- ~次世代は1,000ビット
- 疎結合のみの実装 (完全結合は困難)

T. Kadowaki et al., Phys. Rev. E 58, 5355 (1998)  
D. Aharonov et al., SIAM Rev. (2008)  
M. W. Johnson et al., Nature 194, 473 (2011)

参考：<http://www.dwavesys.com>



### D-wave Oneのキメラグラフ構造

疎結合により任意の結合を実装するため、8量子ビットで1ロジカルビットを表現。Nグラフを実装するのに $N^2$ 量子ビット必要

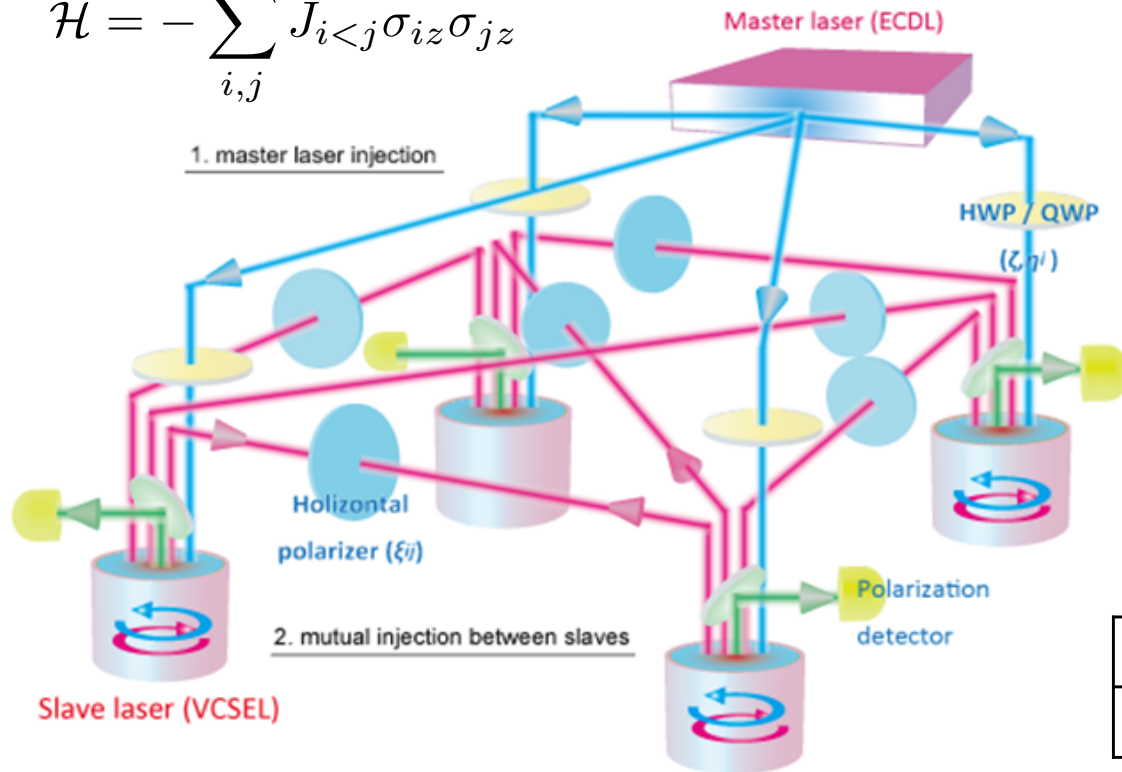
S. Boixo et al., Nature Physics 10, 218–224 (2014)

❖ The \$15 million D-Wave Two is still no faster than a desk top computer right now, in certain situations. D-wave two can sometimes achieve speeds up to five times faster than the Intel PC.

# 光の発振器の同期現象を使った コヒーレントイジングマシン

イジングハミルトニアンをレーザーネットワークの損失 (=発振利得) にマップする

$$\mathcal{H} = - \sum_{i,j} J_{i<j} \sigma_{iz} \sigma_{jz}$$



結合レーザー系に相互注入が導入されると、全体でのロスを少なくするような（相互結合による内部パワーの増加を最大化するような）発振モードを、発振器ネットワークが自分自身で選択する

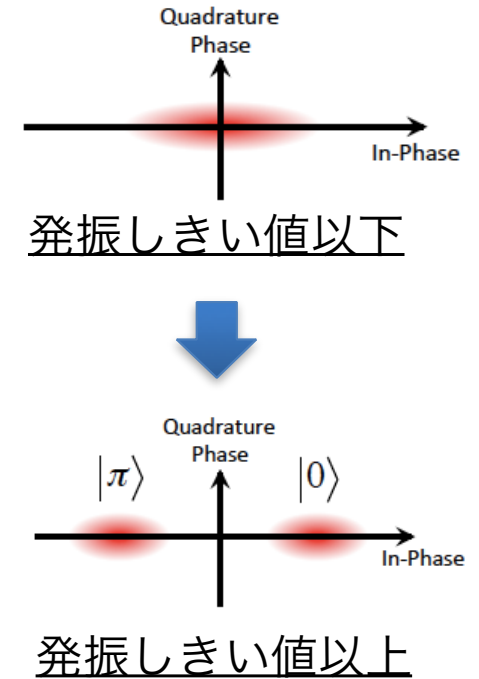
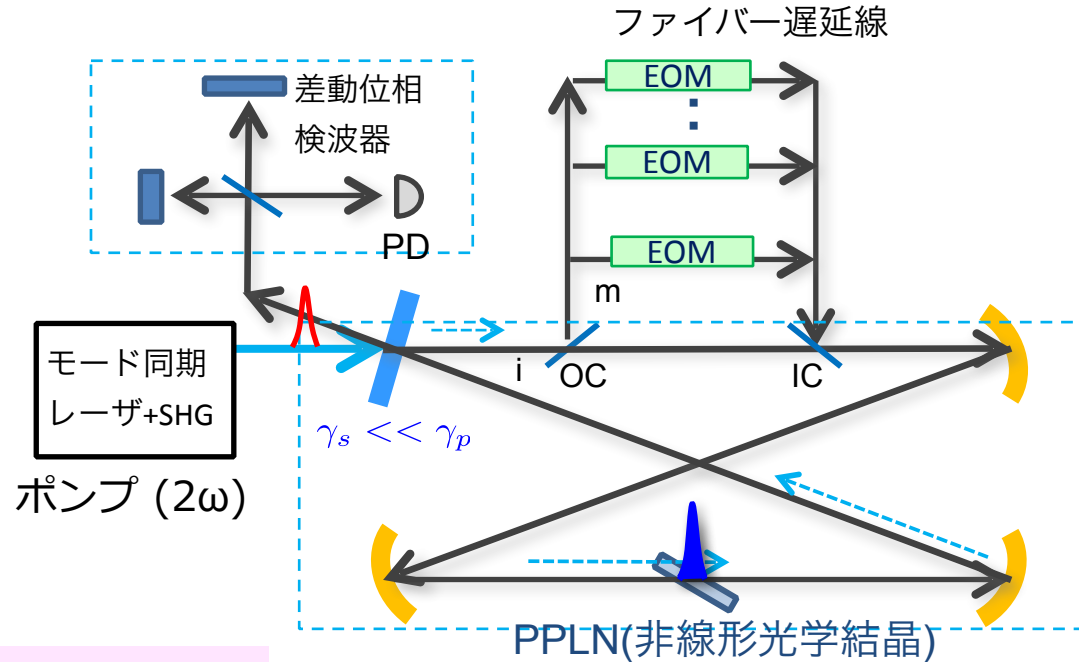
OPOネットワーク	イジングモデル
最小損失	最小エネルギー状態

イジングスピン  $\sigma_i^z = +1 \text{ or } -1$  : 各レーザーの発振モード  
 イジング結合  $J_{ij}$  : レーザーネットワークの結合強度と位相

- 各レーザーが自発的に、系に実装された条件に応じて最も効率の良い発振基底を選ぶ。
- その発振基底の組み合わせ ( $1/2^N$  個の候補のうち 1 通り) が解きたい問題の答えに対応する。

# DOPOネットワークを用いたコヒーレントイジングマシン

## DOPO (縮退型光パラメトリック発振器)



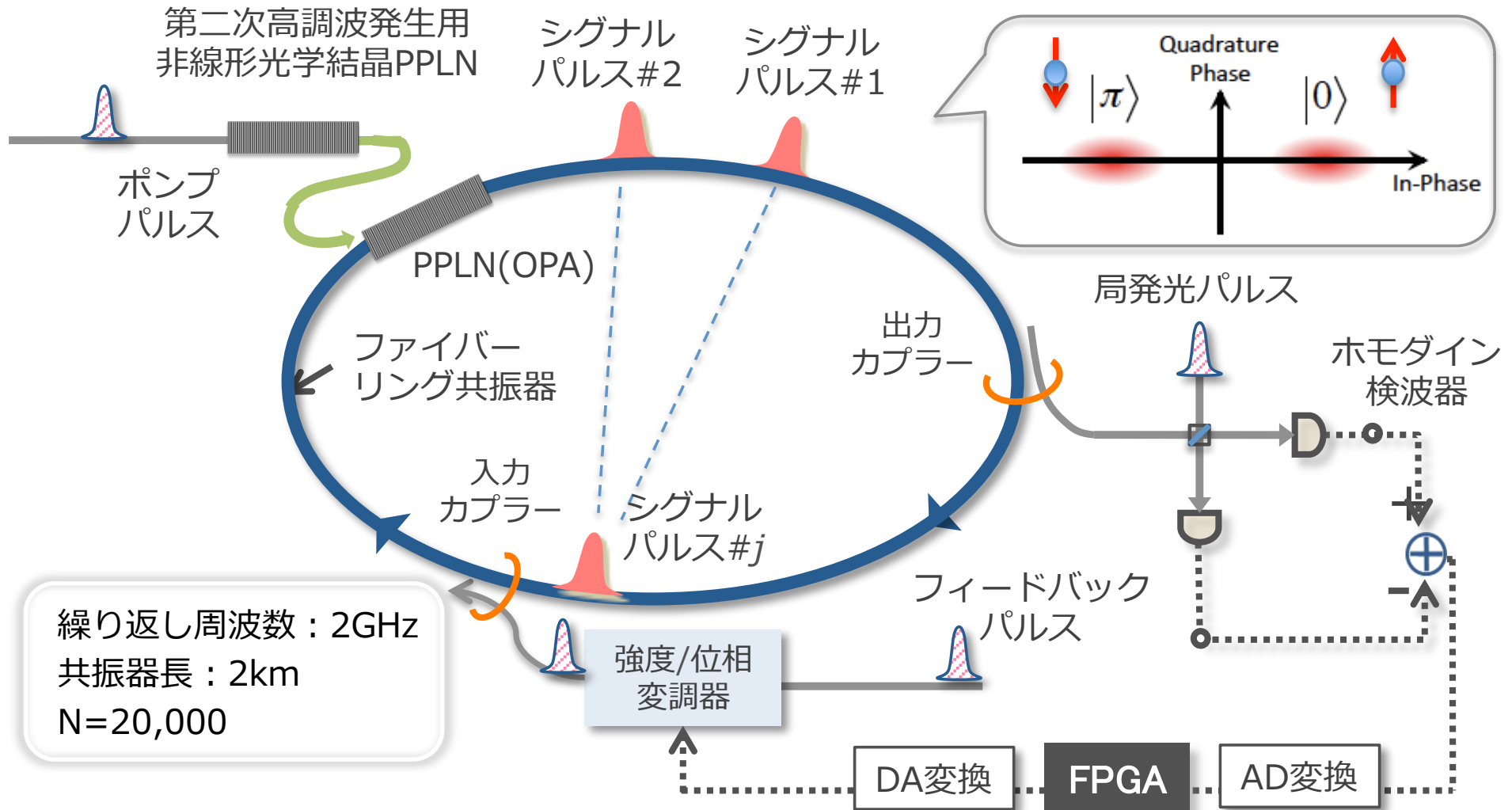
N光パルス (単一共振器内)  
相互結合パスの数: N-1

イジングハミルトニアン:  $\mathcal{H} = - \sum_{i,j} J_{i<j} \sigma_{iz} \sigma_{jz}$

イジングスピン  $\sigma_i^z = +1 \text{ or } -1$  : OPO発振モード (位相: 0または $\pi$ )

イジング結合  $J_{ij}$  : 光相互結合の振幅と位相

# 量子測定-フィードバックを用いたコヒーレントトイジングマシン



- ✓ 各周回ごとに光パルスはホモダイン検波により測定される
- ✓ すべての光パルスの測定データ $\sigma_{iz}$ をもとに、光結合を実現するフィードバックパルスを生成する
  - (  $\sum_j J_{ij} \sigma_{jz}$  を電気信号により計算し、結合用の光パルスを加工する )
  - 問題 ( $J_{ij}$ ) を実装するために必要だったN本遅延線が、1本で実装可能

# ImPACT 量子人工脳プロジェクト構成

## 量子光学理論

- 宇都宮 (NII) グループ : 量子光学理論に基づいた性能予測、システム設計、  
数値計算ベンチマーク
- Mabuchi (Stanford) グループ : 量子測定-フィードバック理論

## 脳型情報処理

- 合原 (東大) グループ : ニューラルネットワーク, 機械学習, 分岐理論

## グラフ理論

- 河原林 (NII) グループ : 組み合わせ問題に関するグラフ理論

## 実装技術

- 武居 (NTT) グループ : DOPOネットワークの大規模化
- 井上 (阪大) グループ : FPGAを用いた量子測定-フィードバック回路の構築
- 宇都宮 (NII) グループ : レーザーネットワークを用いたXY/ハイゼンベルグマシン
- Byer, Fejer, Mabuchi (Stanford) グループ : DOPOネットワーク, PPLN チップ, FPGA  
プロトタイプ設計
- アルネアラボラトリ : モード同期レーザーネットワークの大規模化



# 量子人工脳の将来予測

- 実用的な量子マシン：室温動作、コンパクトなサイズ、高速計算
- 大規模化

共振器数：N（スタンダード） → 1（多重パルスOPO）

光結合回路数：N<sup>2</sup>（スタンダード） → 1（量子測定フィードバック）

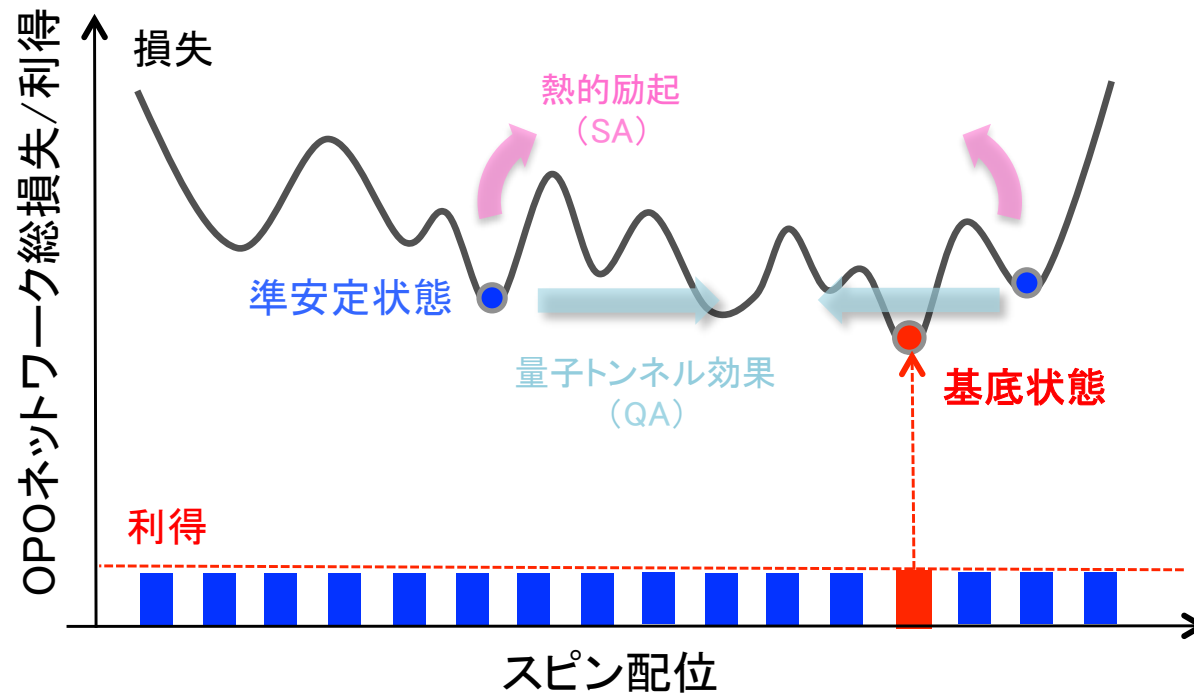
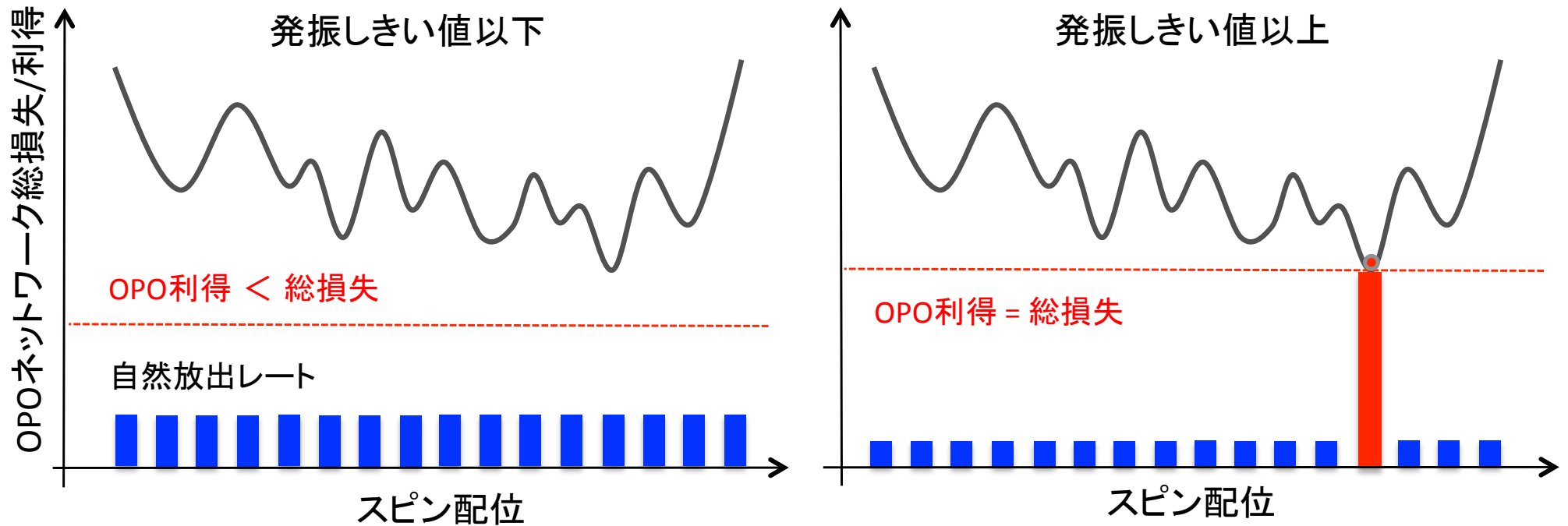
N=10<sup>6</sup>サイトマシン：クロック周波数20GHz、ファイバー長10km（2dB損失）

N=10<sup>9</sup>サイトマシン：1000台のコヒーレント・イジングマシンによる  
並列計算（FPGA間の相互接続が鍵）

## 達成目標とスケジュール

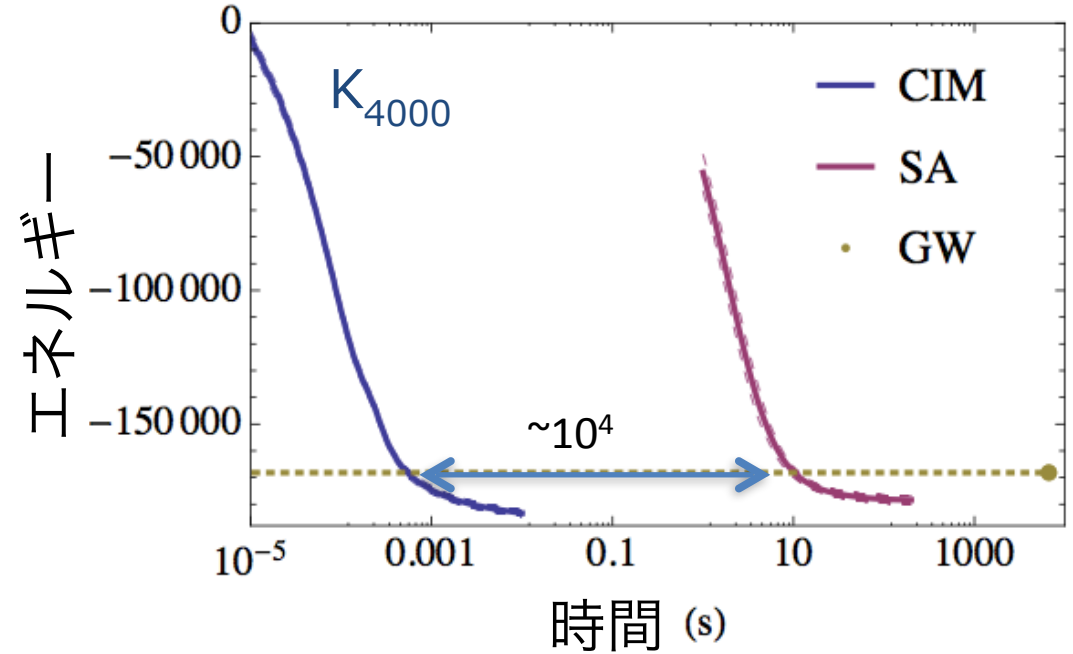
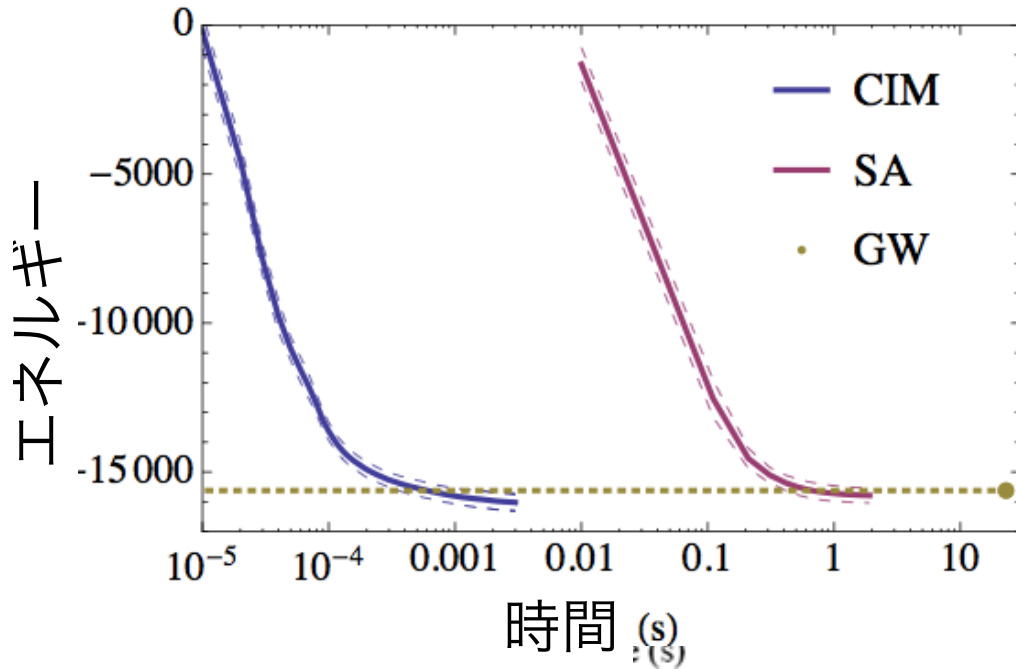
達成目標	現状	スケジュール	相当する量子アニーラー/ CMOSアニーラーの規模	備考
128 bit マシン	光学系(OPO)開発済 電気系(FPGA)開発済	2015.10	$>10N^2 \approx 1.6 \times 10^5$ (量子ビット/CMOSゲート)	日立チップと同規模 精度・計算時間で比較
2048 bit マシン	光学系(OPO)開発済 電気系(FPGA)開発中	2016.3	$\geq 10N^2 \approx 4 \times 10^7$ (量子ビット/CMOSゲート)	現代コンピュータに 比べ 3桁速い
10 <sup>5</sup> bit マシン	光学系(OPO)開発中 電気系(FPGA)設計中	2018.12	$\geq 10N^2 \approx 10^{11}$ (量子ビット/CMOSゲート)	現代コンピュータに 比べ 6桁速い

# コヒーレント・イジングマシンの動作原理



# DOPO ネットワーク(コヒーレント・イジングマシン : CIM)の計算能力

～ 完全グラフに対する焼きなまし法 (SA) と 精度保証つきアルゴリズム (GW) との比較～



## 【精度保証付き近似手法】

Goemans Williamson Semi-Definite Programming

(approximate algorithm)

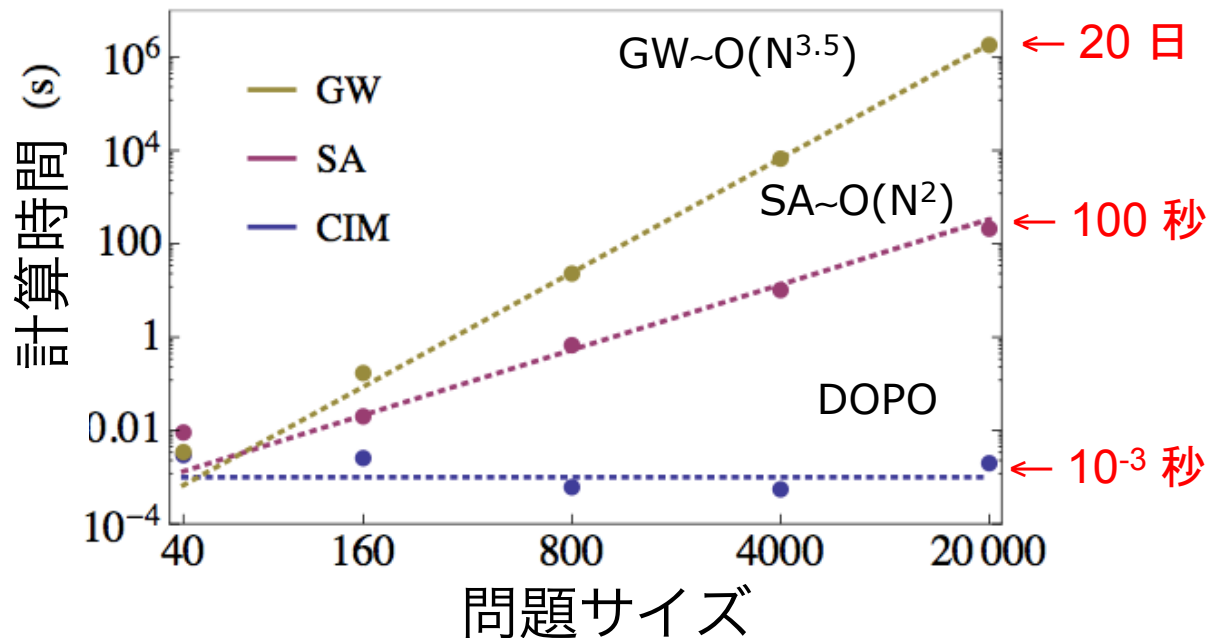
87.8%の精度で解が求まることを保証

## 【ヒューリスティック】

Simulated Annealing

(焼き鈍し法)

精度保証はないが、ある程度のレベルで正解に近い解を求めることができる。



# スケーラブルなシステムに向けた課題

クロック周波数 10 GHz + ファイバ共振器 2km →  $N=10^5$  サイトイジングマシン  
光フィードバック遅延線:  $N^2$  (光結合系) → 1 (量子測定-フィードバック系)

## - グラフ再構成が可能な測定フィードバックシステム

- 任意のイジング結合がADC/DAC, FPGAで実装できる
- 多体相互作用、動的なパラメータなどの実装、再構成が可能。
  - ➔ ニューラルネットワークなどの実装など拡張性が高い
- 大規模化した際の計算時間のスケーリングはFPGA内部演算時間に制限される

## - 全光結合フィードバックにより更なる計算の高速化を狙う

- 計算時間はレーザー/OPOの発振遅延時間のみで律則される  $\sim O(1)$ 。高速な変調制御システムと長い共振器の安定化が必要
- Nサイトの任意のグラフ~完全グラフが実装可能
  - 6遅延線+ $N^2$  光パルス (マイナーエンベッティング手法)
  - (N-1)遅延線+N光パルス (時分割多重手法)